

**“DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS
ENSAYOS QUE PROPORCIONAN LOS VALORES DE RESISTENCIA DE LA
SUBRASANTE EN EL TRAMO DE LA CARRERA 45 CON CALLE 86 HASTA
EL PARQUE DE ARANJUEZ DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO
METROPLÚS”**

GABRIEL JAIME GÓMEZ
C.C. 71.797.436 DE MEDELLÍN

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN
2009

**“DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE LOS
ENSAYOS QUE PROPORCIONAN LOS VALORES DE RESISTENCIA DE LA
SUBRASANTE EN EL TRAMO DE LA CARRERA 45 CON CALLE 86 HASTA
EL PARQUE DE ARANJUEZ DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO
METROPLÚS”**

GABRIEL JAIME GÓMEZ
C.C. 71.797.436 DE MEDELLÍN

Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Especialista en Vías y Transporte

Asesor:
CARLOS RODOLFO MARÍN URIBE

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS Y TRANSPORTE
MEDELLÍN
2009

CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE FIGURAS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE ESTUDIO	7
3. MARCO GEOLÓGICO.....	8
3.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	10
4. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	12
4.1 RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO C.B.R.	12
4.1.1. Equipo y materiales	13
4.1.2 Ensayos realizados para el diseño de la estructura.....	16
4.1.3 CBR inalterado durante la ejecución de obra	17
4.2 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (P.D.C).....	19
4.2.1 Resumen del método.....	20
4.2.2 Equipo.....	20
4.2.3 Procedimiento	22
4.2.4 Cálculos e interpretación de los resultados	25
4.2.5 Precisión y tolerancias	26
4.2.6 Ensayos realizados para el diseño de la estructura.....	26
4.2.7 Realizados por la Supervisión	28
4.3 ENSAYO DE PLACA.....	29
4.3.1 Equipo	30
5. CORRELACIONES OBTENIDAS	35
5.1 Entre ensayos de PDC y CBR.....	35
5.2 Entre ensayos de CBR y Placa	36
6. CONCLUSIONES	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de los apiques	10
Tabla 2. %C.B.R inalterado sumergido 96 horas.	17
Tabla 3. CBR Inalterado durante la ejecución de obra	18
Tabla 4. Correlación entre el P.D.C y C.B.R para diseño	27
Tabla 5. Correlación entre el P.D.C y C.B.R durante la ejecución de obra.....	28
Tabla 6. Resultados ensayo de placa	33

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la vía del proyecto	7
Figura 2. Geología regional en los alrededores del proyecto.....	8
Figura 3. Equipo para determinar el C.B.R.	14
Figura 4. Valores de CBR inalterados.....	17
Figura 5. CBR Inalterado para diseño y ejecución de obra.....	19
Figura 6. Esquema del dispositivo PDC.....	21
Figura 7. Cono reutilizable	22
Figura 8. Esquema del gato extractor del PDC.....	24
Figura 9. Valores CBR Inalterados y correlación P.D.C.....	27
Figura 10. Correlación PDC durante la ejecución de obra.....	29
Figura 11. Equipo para el ensayo de placa.....	31
Figura 12. Modulo de reacción de la subrasante	34
Figura 13. PDC Vs CBR	35
Figura 14. CBR Vs Ensayo de Placa	36

1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de los proyectos viales, deben realizarse ensayos para determinar la resistencia de los suelos de apoyo, que nos permiten determinar el espesor de la estructura de la vía. En nuestro medio, los más utilizados son el Penetrómetro Dinámico de Cono que fue desarrollado en Suráfrica, presentado por Van Vuuren en 1969, Kleyn en 1975, Harrison en 1987, The U.S. Army en 1992 y normatizado en nuestro país en la I.N.V.E. 172 – 07; el California Bearing Ratio (CBR) que tuvo su origen en California normatizado en nuestro país en la I.N.V.E. 148 – 07, y el de Placa normatizado en nuestro país en la I.N.V.E. 168 – 07, los cuales son correlacionados por diferentes fórmulas determinadas para ciertos tipos de suelos y bajo condiciones variables, que influyen en los resultados arrojados.

La investigación desarrollada en este proyecto toma como base las obras ejecutadas en el Municipio de Medellín, sobre la Carrera 45 entre la Calle 86 y la Calle 93, y la Calle 93 desde la Carrera 45 hasta el Parque de Aranjuez, que hacen parte de las obras que se están llevando a cabo en el Sistema de Transporte Masivo METROPLÚS.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE ESTUDIO

La vía se encuentra ubicada en el nororiente de la ciudad de Medellín, en los sectores de Manrique y Aranjuez y consta de una calzada con dos carriles de circulación en pavimento flexible, la cual va ser modificada en pavimento rígido, para el tránsito de los buses de Metroplús en una longitud aproximada de 1.4 Km. En la **Figura 1** se muestra la ubicación del proyecto, que comprende la Carrera 45 desde la Calle 86 hasta la Calle 93 y la Calle 93 desde la Carrera 45 hasta el Parque de Aranjuez, incluyendo las cuatro calles del Parque.

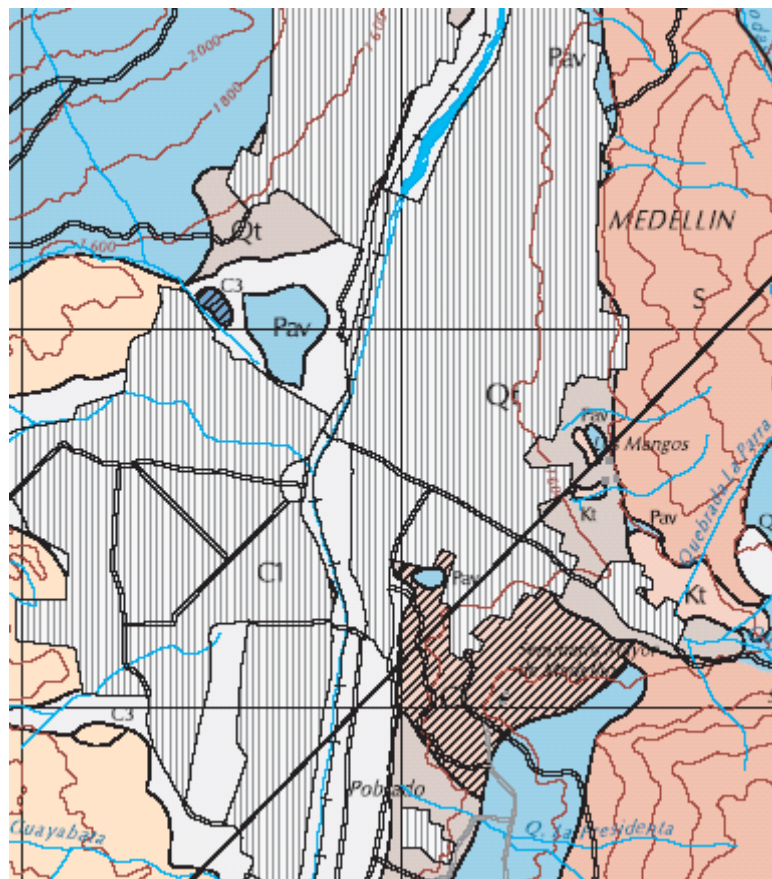
Figura 1. Ubicación de la vía del proyecto



3. MARCO GEOLÓGICO

La zona del proyecto se enmarca dentro de una unidad litológica que comprende un sistema de depósitos de vertiente, del tipo flujos de lodos y escombros, con diferentes edades, condiciones de alteración y espesores, que reposan sobre un macizo rocoso, alterado y fracturado, perteneciente a la denominada anfibolita de la margen derecha del río Medellín. En la **Figura 2** se puede observar la ubicación del proyecto dentro del Mapa de Geología Regional de Medellín, del Ingeominas y sobre la unidad referenciada de taludes reciente o depósitos de vertiente.

Figura 2. Geología regional en los alrededores del proyecto



Específicamente los depósitos corresponden con intercalaciones de flujos de lodos, compuestos por materiales de texturas limo arcillosas a limo arenosas (MH a ML), de colores pardo rojizas a pardo amarillentas y localmente gris parduscas, bajo consistencias friables a firmes en húmedo y plásticos y pegajosos en mojado, donde se desarrollan particularmente algunas costras de sesquióxidos de hierro y aluminio, duras a frágiles, con espesores centimétricos a milimétricos y con algunos fragmentos rocosos, desde frescos hasta totalmente meteorizados, compuestos por anfibolita y dunita, angulares a subangulares y que alcanzan a representar un 10% a 20% por volumen del depósito. Este tipo de depósito posee baja permeabilidad, se excava con procedimientos manuales, en condiciones de índice de liquidez firme a semisólido posee buenas características de resistencia a la compresión uniaxial, con valores entre 100 y 200 kPa.

Otro tipo de depósito que se encuentra son los flujos de escombros, que corresponde con una acumulación de fragmentos rocosos, subangulares, con tamaños entre grava media y bloques de 0.25 m de lado, parcialmente meteorizados, los cuales se rompen con tres a cuatro golpes del martillo geológico, embebidos dentro de una matriz limo arenosa a limo arcillosa (entre SM y ML), de consistencia en húmedo friable a firme, en mojado ligeramente plástica y no pegajosa, color amarilla pardusca. La relación por volumen entre fragmentos y matriz está alrededor del 60%/40%, respectivamente. Estos materiales poseen una permeabilidad moderada a baja, que depende del tipo matriz y el porcentaje de bloques. En algunos casos, según el gradiente hidráulico que se presente, es común el desarrollo de procesos de tubificación. Además, bajo condiciones de índice liquidez semisólido y firme, de la matriz, adquiere una resistencia a la compresión uniaxial entre 80 y 120 kPa, pero en conjunto, si se considera los bloques, la resistencia del depósito es mucho mayor. Para condiciones de excavación, según el porcentaje y tamaño de los bloques se pueden necesitar medios mecánicos y no manuales.

En general, la geomorfología corresponde con vertientes planas a onduladas, moderadamente disectadas por drenajes subparalelos, los cuales se encuentra en su mayoría intervenidos por obras inotrópicas. Los gradientes de inclinación son en su mayoría moderados y localmente se presentan fuertes. Como la zona esta completamente urbanizada, los procesos que se reconocen se ubican hacia los ejes de los drenajes y corresponden con fenómenos de socavación y desgarramientos en los flancos.

3.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Para la caracterización geotécnica de la zona se realizaron catorce (14) apiques de 1.50 m de profundidad cada uno, cuya ubicación se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Ubicación de los apiques

Apique No.	LOCALIZACIÓN
1	Carrera 45 No 86-18, costado derecho
2	Carrera 45 No 87-17, eje
3	Carrera 45 No 88-22, costado izquierdo
4	Carrera 45 a 10m al norte del No 88-109, costado derecho
5	Carrera 45 No 90-34, eje
6	Carrera 45 No 92-21, costado izquierdo
7	Carrera 45A No 92-107
8	Calle 93 No 45A-74, eje
9	Calle 93 No 46A-11, costado izquierdo
10	Calle 93 No 47-47, costado derecho
11	Carrera 49 a 10m al norte de la calle 93, eje
12	Calle 94 No 49-20, costado izquierdo
13	Carrera 49A a 5m del norte del No 93-73, costado derecho
14	Calle 93 No 49-45, eje

En cada uno de los apiques se extrajeron muestras de las diferentes capas existentes, realizando los siguientes ensayos:

- Perfiles estratigráficos aproximados de cada uno de los sondeos.
- Determinación de la humedad natural.
- Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite plástico).
- Gradación de los materiales encontrados.
- Clasificación de los suelos.
- CBR sobre muestra inalterada y sumergida para el material de subrasante.
- Penetrómetro Dinámico de Cono (P.D.C).

El registro fotográfico y los resultados obtenidos en los catorce (14) apiques pueden ser observados en el **Anexo A**.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para el desarrollo del presente proyecto utilizaremos los resultados obtenidos en los ensayos de CBR, P.D.C. y de Placa realizados para el diseño de la estructura y durante el desarrollo de la obra.

4.1 RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO C.B.R.

Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles.

Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR es bajo, tales como materiales de grano grueso sin cohesión, o cuando se permita una tolerancia en relación con el efecto de diferentes contenidos de agua de compactación en el procedimiento del diseño, el CBR se puede determinar al contenido óptimo de agua de un esfuerzo de compactación especificado. La masa unitaria seca especificada corresponde, generalmente, al porcentaje mínimo de compactación permitido al usar las especificaciones para compactación en el campo.

Para aplicaciones en las cuales el efecto del contenido de agua de compactación sobre el CBR se desconoce, o en las cuales se desea tener en cuenta su efecto, el CBR se determina para un rango de contenidos de agua, usualmente el permitido para compactación en el campo empleando las especificaciones existentes para tal fin.

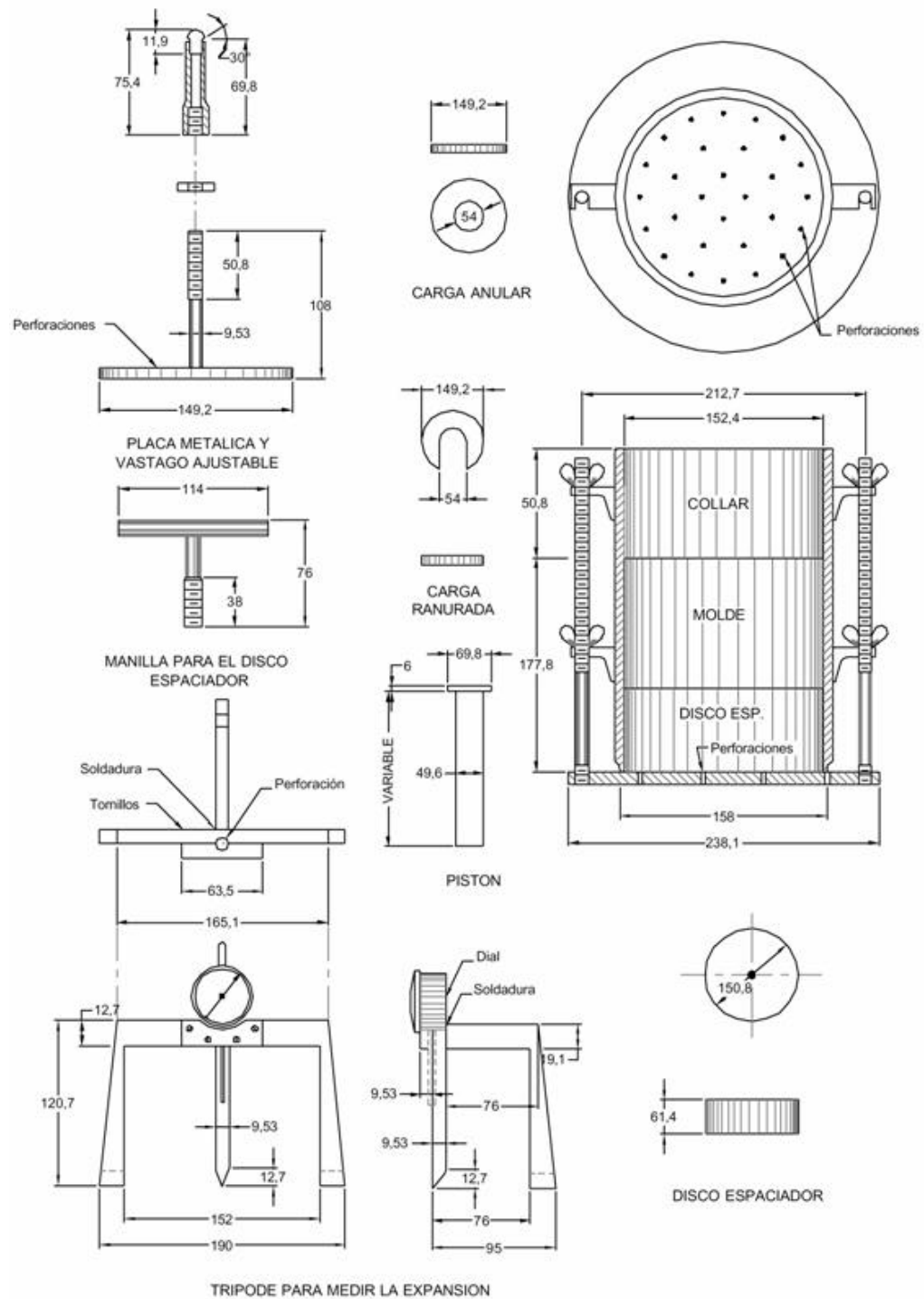
El criterio para la preparación de especímenes de prueba de materiales autocementantes (y otros), los cuales ganan resistencia con el tiempo, se debe basar en una evaluación de ingeniería geotécnica. Los materiales de autocementantes, deben curarse apropiadamente hasta que se pueda medir relaciones de soporte representativas de las condiciones de servicio a largo plazo, de acuerdo con el criterio del Ingeniero.

4.1.1. Equipo y materiales

Prensa – Similar a las usadas en ensayos de compresión, utilizada para forzar la penetración de un pistón en el espécimen. El pistón se aloja en el cabezal y sus características deben ajustarse a las especificadas. Debe tener una capacidad suficiente para penetrar el pistón en el espécimen a una velocidad de 1.27 mm/min (0.05"/min) y hasta una profundidad de 12.7 mm (0.5").

El desplazamiento entre la base y el cabezal se debe poder regular a una velocidad uniforme de 1.27 mm (0.05") por minuto. La capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga deben ser de 44.5 kN (10000lbf) ó más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44N ó menos

Figura 3. Equipo para determinar el C.B.R.



Moldes – De metal, cilíndricos, de $152,4 \text{ mm} \pm 0.66 \text{ mm}$ ($6 \pm 0.026"$) de diámetro interior y de $177,8 \pm 0.46 \text{ mm}$ ($7 \pm 0.018"$) de altura, provisto de un collar suplementario de 51 mm ($2.0"$) de altura y una placa de base perforada de 9.53 mm ($3/8"$) de espesor. Las perforaciones de la base deberán ser por lo menos 20 uniformemente espaciadas dentro de la circunferencia del molde, no excederán de $1,6 \text{ mm}$ ($1/16"$) de diámetro (Figura 1). La base se deberá poder ajustar a cualquier extremo del molde.

Disco espaciador – De forma circular, metálico, de $150.8 \pm 0.8 \text{ mm}$ ($5 \frac{15}{16} \pm 1/32"$) de diámetro y de $61.37 \pm 0.25 \text{ mm}$ ($2.416 \pm 0.01"$) de espesor (Figura 1), para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación.

Martillos de compactación – Como los descritos en las normas INV E – 141 (equipo normal) e INV E – 142 (equipo modificado).

Aparato medidor de expansión – compuesto por:

- Una placa de metal perforada, por cada molde, de $149.2 + 1.6 \text{ mm}$ ($5 \frac{7}{8} \pm 1/16"$) de diámetro, cuyas perforaciones no excedan de $1,6 \text{ mm}$ ($1/16"$) de diámetro. Estará provista de un vástago en el centro con un sistema de tornillo que permita regular su altura **Figura 3**.
- Un trípode cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, que lleve montado y bien sujeto en el centro un dial (deformímetro), cuyo vástago coincida con el de la placa, de forma que permita controlar la posición de éste y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm ($0.001"$).

Sobrecargas metálicas – Unas diez por cada molde, una anular y las restantes ranuradas, con una masa de $2,27 \pm 0.04 \text{ Kg}$ ($5 \pm 0.10 \text{ lb}$) cada una, $149.2 + 1.6$

mm ($5 \frac{7}{8} \pm 1/16$ ") de diámetro exterior y la anular con 54 mm de diámetro en el orificio central.

Pistón de penetración – Cilíndrico, metálico de 49.63 ± 0.13 mm de diámetro (1.954 ± 0.005 "), área de 1935 mm² (3 pulg²) y con longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con las sobrecargas precisas, pero nunca menor de 101.6 mm (4").

Dos diales (deformímetros) – Con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones en 0.025 mm (0.001"), uno de ellos provisto de una pieza que permita su acoplamiento en la prensa para medir la penetración del pistón en la muestra.

Tanque – Con capacidad suficiente para la inmersión de los moldes en agua.

Horno – Termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$)

Balanzas – Una de 20 kg de capacidad, y otra de 1000 g con sensibilidades de 5 g y 0.1 g respectivamente.

Tamices – De 4.75 mm (No.4) y de 19.0 mm (3/4").

Material diverso de uso general como cuarteador, mezclador, enrasador, cápsulas, probetas, espátulas, discos de papel de filtro del diámetro del molde, etc.

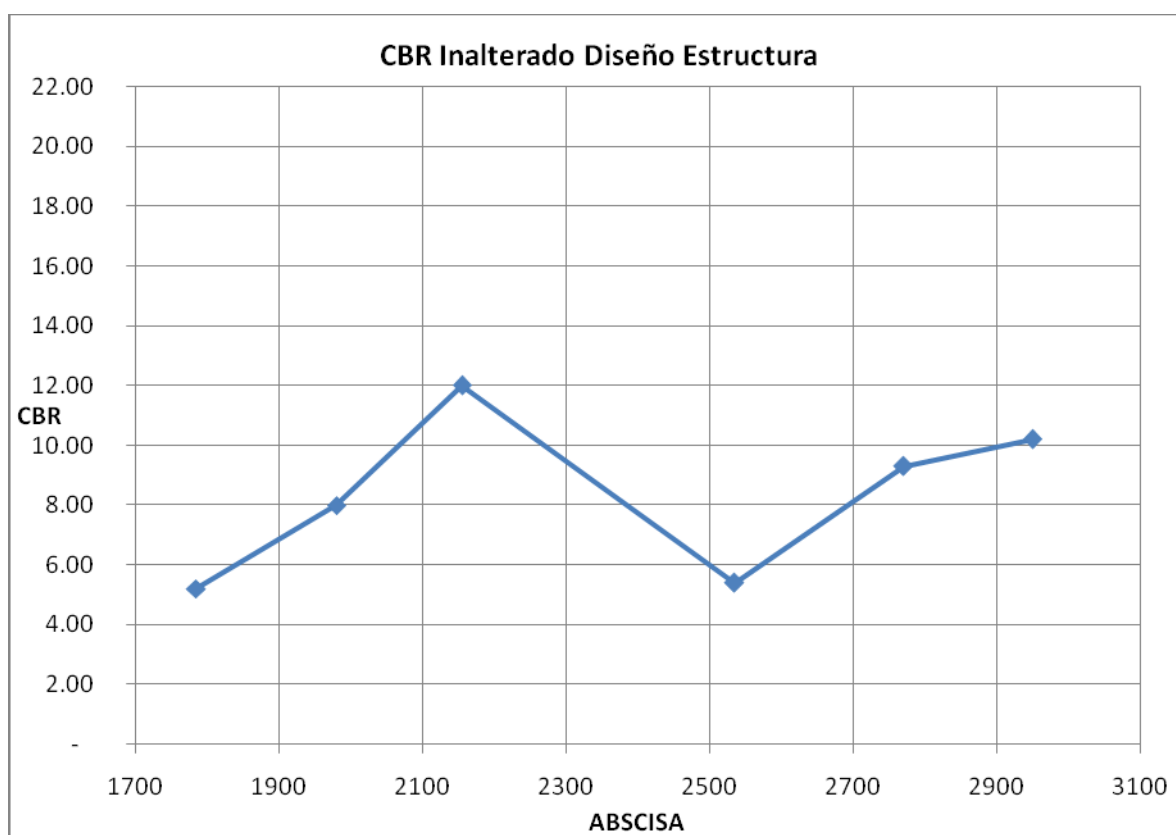
4.1.2 Ensayos realizados para el diseño de la estructura

Se presenta la resistencia de la subrasante a través del ensayo de C.B.R inalterado sumergido 96 horas. En la **Tabla 2** se puede observar el C.B.R en los seis (6) apiques, 1, 3, 5, 9, 11 y 13, realizados para la caracterización geotécnica, con su respectivo porcentaje de expansión.

Tabla 2. %C.B.R inalterado sumergido 96 horas.

APIQUE	PROFUNDIDA		C.B.R	EXPANSIÓ
	DE	A		
1	500	1100	5.20	0.49
3	500	800	8.00	0.95
5	330	1500	12.00	0.19
9	600	1500	5.40	0.13
11	420	1500	9.30	0.12
13	500	13500	10.20	0.10

Figura 4. Valores de CBR inalterados



4.1.3 CBR inalterado durante la ejecución de obra

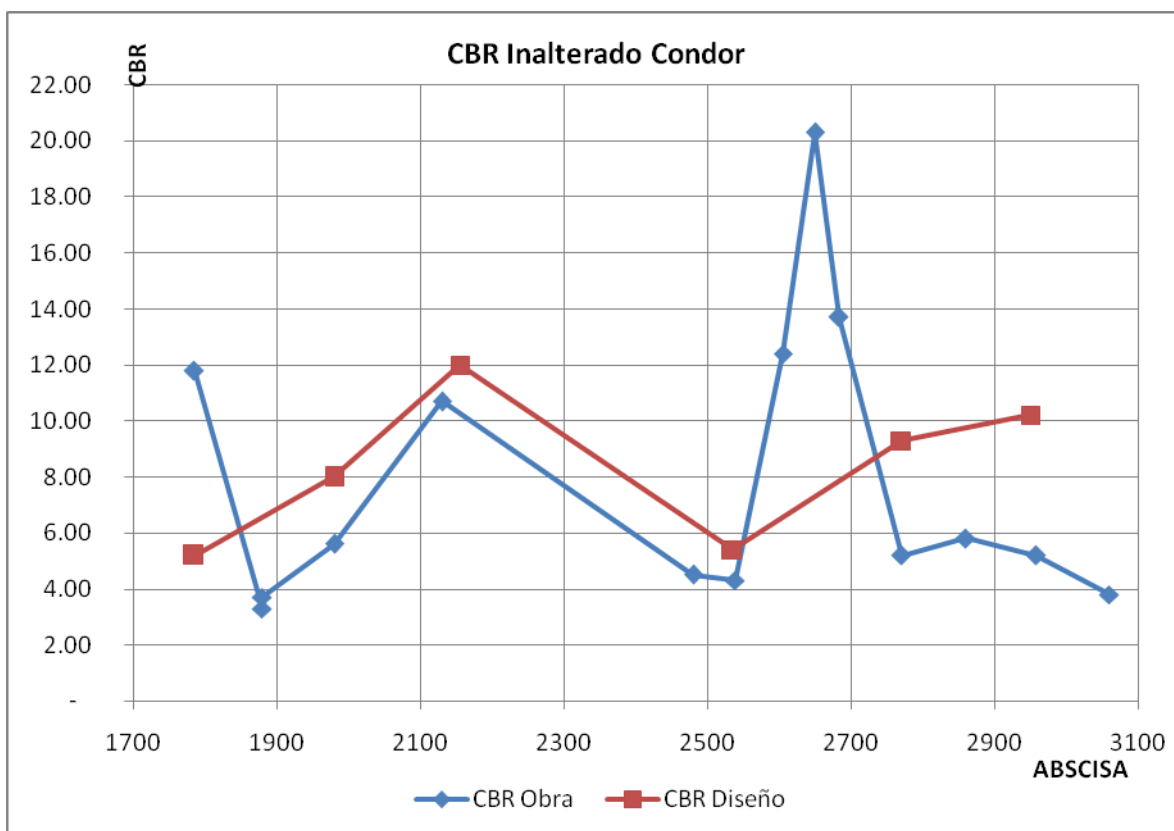
Se realizaron catorce (14) ensayos, los cuales presentaron variaciones significativas con los presentados en la etapa de diseño, aproximadamente desde el K2+500,

debido a las discontinuidades en el suelo de la zona, como se puede observar en la **Figura 5**.

Tabla 3. CBR Inalterado durante la ejecución de obra

No.	CBR Inalterado	ABSCISA
113	11,80	1785
111	3,30	1880
112	3,70	1880
103	5,60	1980
110	10,70	2130
104	4,50	2480
105	4,30	2538
106	12,40	2605
108	20,30	2650
107	13,70	2683
101	5,20	2770
100	5,80	2860
102	5,20	2958
109	3,80	3060

Figura 5. CBR Inalterado para diseño y ejecución de obra



4.2 PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (P.D.C)

Este método de ensayo se usa para evaluar la resistencia in-situ de suelos inalterados y/o materiales compactados. La rata de penetración del PDC de 8 kilogramos puede ser utilizada para estimar el CBR in-situ; para identificar los espesores de las capas; así como para estimar la resistencia al corte de las capas y otras características de los materiales que las constituyen.

El PCD de 8 kilogramos puede ser utilizado para estimar las características de resistencia de suelos de grano fino y grueso, materiales de construcción y materiales débiles modificados o estabilizados. El dispositivo no se puede emplear en materiales altamente estabilizados o cementados o en materiales granulares

que contengan un gran porcentaje de agregados pétreos cuyas partículas tengan partículas con tamaños superiores a 50 milímetros (2").

El PDC puede ser utilizado para estimar la resistencia in-situ de materiales que se encuentren por debajo de una capa altamente estabilizada, previo el barrenado de la misma para permitir un orificio de acceso.

Una medida de campo del PDC, da como resultado un CBR de campo y normalmente no correlaciona satisfactoriamente con el CBR del laboratorio o el CBR sumergido sobre el mismo material. Este ensayo debe interpretarse, entonces, como evaluador de la resistencia in-situ del material bajo las condiciones existentes en el terreno en el instante de la prueba.

4.2.1 Resumen del método

El operador dirige la punta del PDC dentro del suelo, levantando el martillo deslizante hasta la manija y soltándolo para que caiga libremente hasta golpear el yunque. La penetración total para un determinado número de golpes es medida y registrada en términos de milímetros por golpe, valor que es utilizado para describir la rigidez, para estimar una resistencia CBR in-situ a través de una correlación apropiada o para establecer otras características del material.

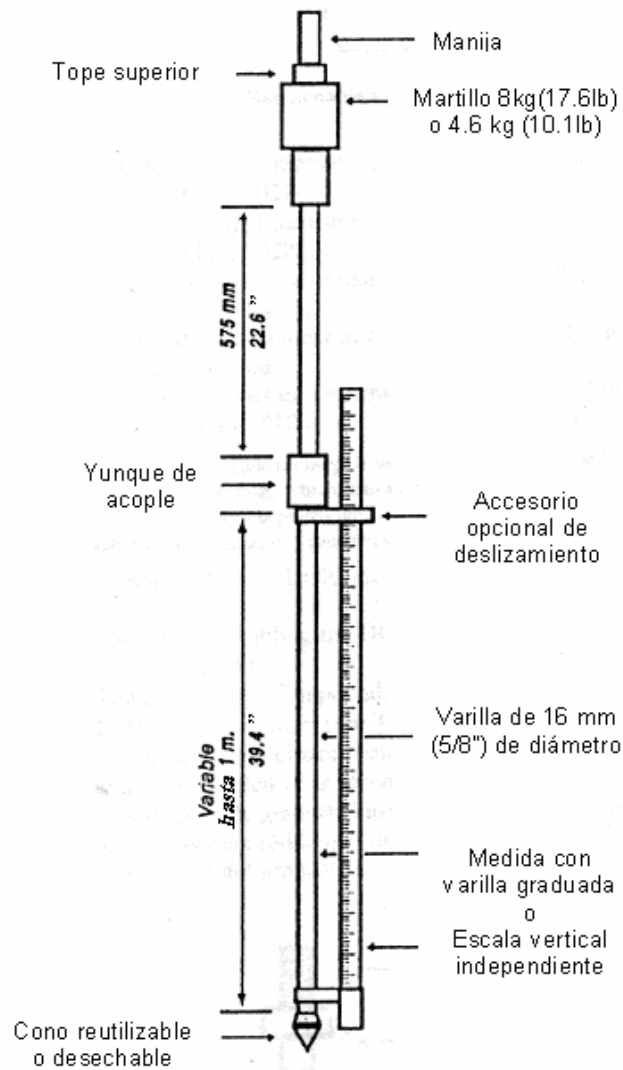
4.2.2 Equipo

El PDC de 8 kilogramos se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Está constituido por los siguientes elementos:

1. Una varilla de acero de 16 milímetros (5/8") de diámetro, con una punta cónica reutilizable o desechable.

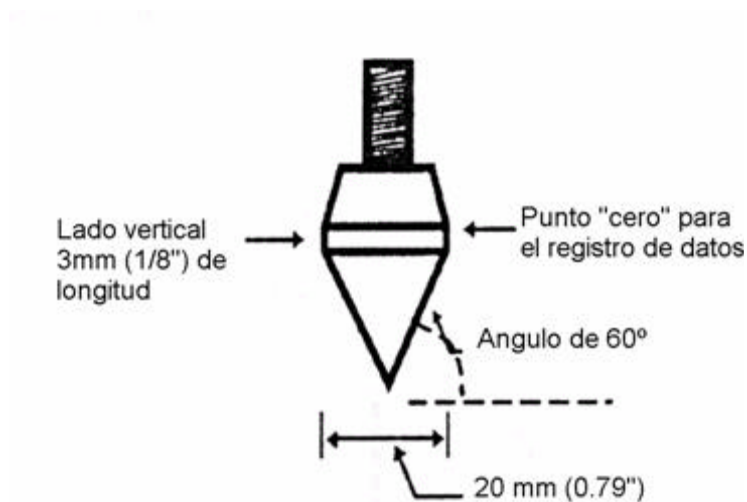
2. Un martillo de 8 kilogramos (17.6 lb) el cual es accionado desde una altura fija de 575 milímetros (22.6")
3. Un yunque de ensamble y una manija. La punta del cono tiene un ángulo de 60° y el diámetro en la base del cono es de 20 milímetros (0.79") (**Figura 7**)

Figura 6. Esquema del dispositivo PDC



El aparato debe ser de acero inoxidable con excepción del cono, el cual puede ser de acero endurecido u otro material similar, resistente al desgaste.

Figura 7. Cono reutilizable



4.2.3 Procedimiento

4.2.3.1 Verificación del equipo

Antes de comenzar un ensayo, el dispositivo PDC debe ser inspeccionado en las partes que pueden sufrir daños por fatiga, en particular en el ensamble y en la manija y se debe verificar que no exista un excesivo desgaste de la varilla ni del cono reutilizable. Todas las juntas deben ser ajustadas con seguridad incluyendo el yunque de ensamble y el cono reutilizable (o el adaptador del cono desechable) a la varilla de ensayo.

4.2.3.2 Operación básica

El operador sostiene el dispositivo a través de la manija en una posición vertical o a plomo y levanta y libera el martillo, de manera que caiga a la altura especificada. El encargado de registrar la información, mide y registra la penetración total para un determinado número de golpes o la penetración por cada golpe.

4.2.3.3 Lectura inicial

El PDC es sostenido verticalmente y la punta es asentada de tal manera que la parte más ancha del cono se encuentre a nivel con la superficie del material a ser ensayado. En ese instante, se toma una lectura inicial de la varilla graduada o de la regla separada para la medición. La distancia se mide con aproximación a 1 mm (0.04"). Algunos accesorios deslizantes de referencia permiten a la escala o a la varilla ser marcados con un "0" cuando el cono está en el punto cero.

Una vez que la capa a ser ensayada ha sido alcanzada, se toma una lectura de referencia con el punto cero en la parte superior de dicha capa y se registran los espesores de las capas que han sido tomadas mediante núcleos. Esta lectura de referencia es el punto a partir del cual se mide la penetración subsecuente.

4.2.3.4 Secuencia de ensayo

Caída del martillo – El dispositivo PDC es sostenido en una posición vertical o a plomo. El operador levanta el martillo hasta que hace ligero contacto con la manija, pero sin golpearla. Entonces, se permite la caída libre del martillo, el cual impacta el yunque de ensamble. El número de golpes y las correspondientes penetraciones se van registrando de acuerdo con el formato preestablecido.

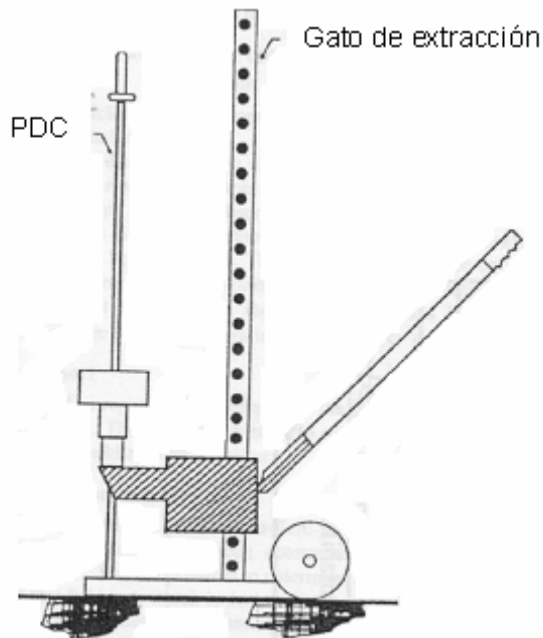
Profundidad de penetración – La profundidad de penetración variará con la aplicación. Para aplicaciones típicas viales, una penetración inferior a 900 mm (35") se considera generalmente adecuada.

Rechazo – La presencia de partículas de gran tamaño o de un estrato rocoso puede conducir a la suspensión de la penetración o a doblar la varilla del aparato. Si luego de 5 golpes el aparato no ha avanzado más de 2 mm (0.08") o la manija se ha deflectado más de 75 mm (3") de su posición vertical, el ensayo se debe detener y el equipo se debe remover hacia otro punto de ensayo. La localización del nuevo punto de ensayo debe ser, por lo menos, a 300 mm (12") de la

localización anterior, para minimizar el error causado por la perturbación del material.

Extracción – Una vez completado el ensayo, el penetrómetro debe ser extraído utilizando el gato de extracción cuando se utilice un cono de tipo reutilizable. Cuando se utilice un cono de tipo desechable, el dispositivo se extrae dirigiendo el martillo hacia arriba y golpeándolo contra la manija.

Figura 8. Esquema del gato extractor del PDC



4.2.3.5 Registro de la información

El formato debe contener la información referente al número de golpes, penetración acumulada en mm, contenido de humedad, si es conocido.

Normalmente, se toman lecturas luego de un número fijo de golpes, por ejemplo, un golpe para suelos blandos, 5 golpes para materiales normales y 10 golpes para materiales muy resistentes. Se debe registrar la penetración aproximada al milímetro más cercano (0.04") para un número específico de golpes. Se debe

tomar una lectura inmediatamente se detecte un cambio significativo en las propiedades de los materiales o en la rata de penetración de la varilla.

4.2.4 Cálculos e interpretación de los resultados

EL CBR estimado in-situ se calcula utilizando el índice PDC. La penetración por golpe se emplea para estimar el CBR in-situ o la resistencia al corte, utilizando alguna correlación apropiada. Por ejemplo, la correlación entre la penetración por golpe (PDC) y el CBR derivada de una ecuación recomendada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, indicada a continuación:

- $CBR = 292 * ND^{1.12}$

Esta ecuación es usada para todos los suelos, menos para los que clasifiquen como CL y tengan un CBR inferior a 10 y los suelos CH, para los cuales el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos recomienda las siguientes expresiones:

Suelos tipo CL con $CBR < 10$:

- $CBR = 1 / (0.017019 * ND)^2$

Suelos CH:

- $CBR = 1 / (0.002871 * ND)$

El Instituto Nacional de Vías acepta cualquier fórmula determinada a partir de experiencias regionales, siempre que se encuentre debidamente sustentada y que su obtención haya sido confiable.

4.2.5 Precisión y tolerancias

Se ha determinado que la desviación estándar de la repetibilidad en el campo y en el laboratorio es menor de 2 mm por golpe. No es posible determinar los límites de reproducibilidad para este ensayo de campo, dado que el ensayo es destructivo por naturaleza y las muestras no son homogéneas y, por lo tanto, no se pueden replicar en el laboratorio ni en humedad ni en densidad.

4.2.6 Ensayos realizados para el diseño de la estructura

Se realizó en los apiques 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 ejecutados para la caracterización geotécnica. Cada uno de los ensayos se inició en el punto de contacto entre el material granular y la subrasante existente.

Con los valores de número dinámico (mm/golpe) de cada uno de los apiques, se correlacionó a través de las siguientes fórmulas para obtener valores de C.B.R.

- $C.B.R = 567 * (ND)^{-1.4}$ Ministerio de Transporte - Antiguo M.O.P.T
- $C.B.R = 249 * (ND)^{-1.1284}$ XIII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

Donde ND = Número dinámico (mm/golpes)

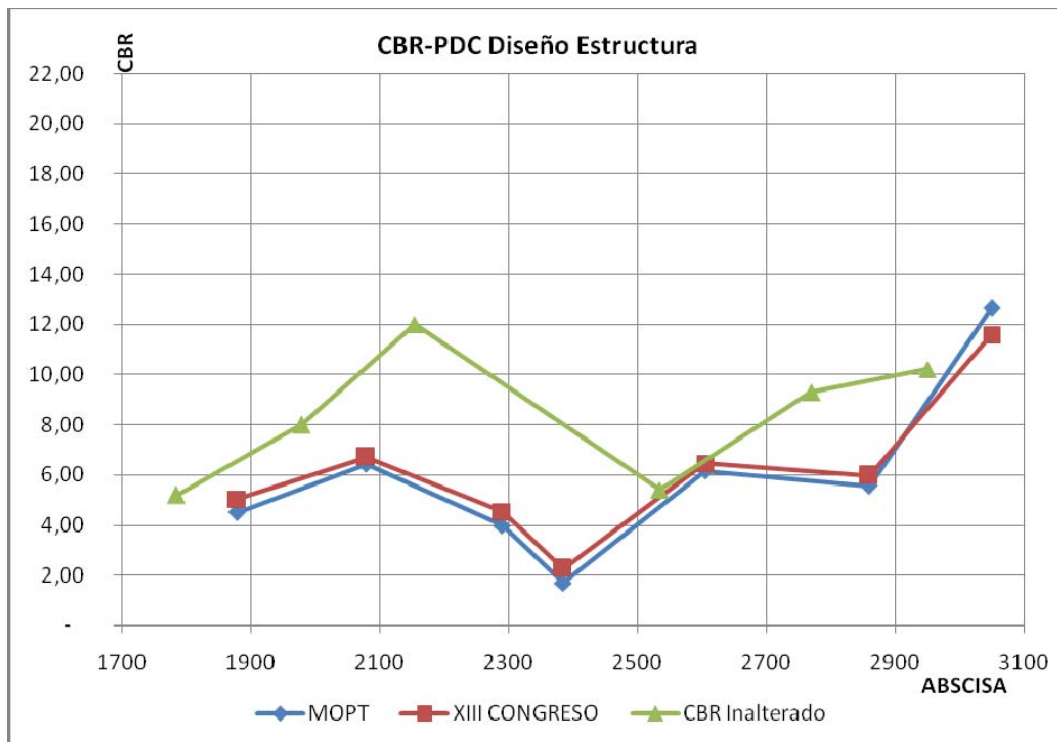
En la **Tabla 4** se puede observar los resultados de la correlación del número dinámico y el valor de C.B.R para los diferentes apiques realizados para el diseño.

Tabla 4. Correlación entre el P.D.C y C.B.R para diseño

APIQUE	C.B.R %	
	M.O.P.T	XIII CONGRESO DE ING INGENIERÍA
2	4.50	5.04
4	6.44	6.71
6	3.99	4.54
8	1.70	2.27
10	6.16	6.45
12	5.55	5.96
14	12.65	11.59

En la anterior tabla se puede observar que las correlaciones presentan valores próximos los cuales, son similares a los resultados obtenidos mediante el ensayo de C.B.R inalterado. En la **Figura 9** se puede observar los valores de C.B.R% inalterado y las diferentes correlaciones.

Figura 9. Valores CBR Inalterados y correlación P.D.C.



Durante el desarrollo del proyecto el Contratista y la Supervisión realizaron ensayos de CBR, PDC y Placa, para verificar los valores de la resistencia en sitios puntuales a lo largo del tramo.

4.2.7 Realizados por la Supervisión

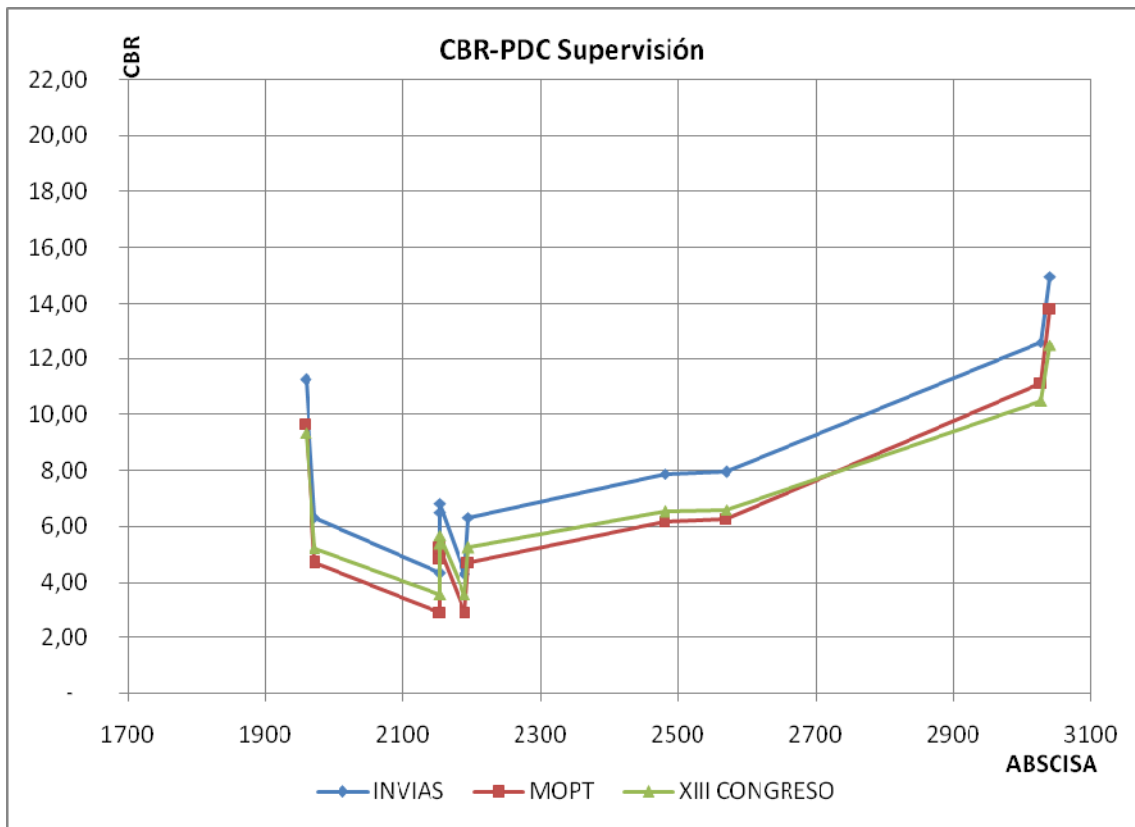
Los ensayos de PDC efectuados por la Supervisión fueron correlacionados con el C.B.R. por medio de las ecuaciones propuestas por el MOPT, el XIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil y en la norma INV E-172-07, enunciada a continuación:

- $C.B.R = 292 * (ND)^{-1.12}$

Tabla 5. Correlación entre el P.D.C y C.B.R durante la ejecución de obra

No.	CBR	ND	CBR			ABSCISA
	Inalterado		INVIAS	MOPT	XIII CONGRESO	
5		18,34	11,23	9,66	9,35	1960
1		30,74	6,30	4,69	5,22	1972
9		43,02	4,32	2,93	3,57	2155
10		29,96	6,48	4,86	5,37	2155
11		28,60	6,83	5,18	5,66	2155
7		43,13	4,31	2,92	3,56	2189
8		30,66	6,32	4,70	5,23	2196
2		25,24	7,85	6,18	6,52	2480
3		25,00	7,94	6,26	6,59	2571
4		16,58	12,57	11,12	10,47	3028
6		14,20	14,96	13,82	12,47	3040

Figura 10. Correlación PDC durante la ejecución de obra



4.3 ENSAYO DE PLACA

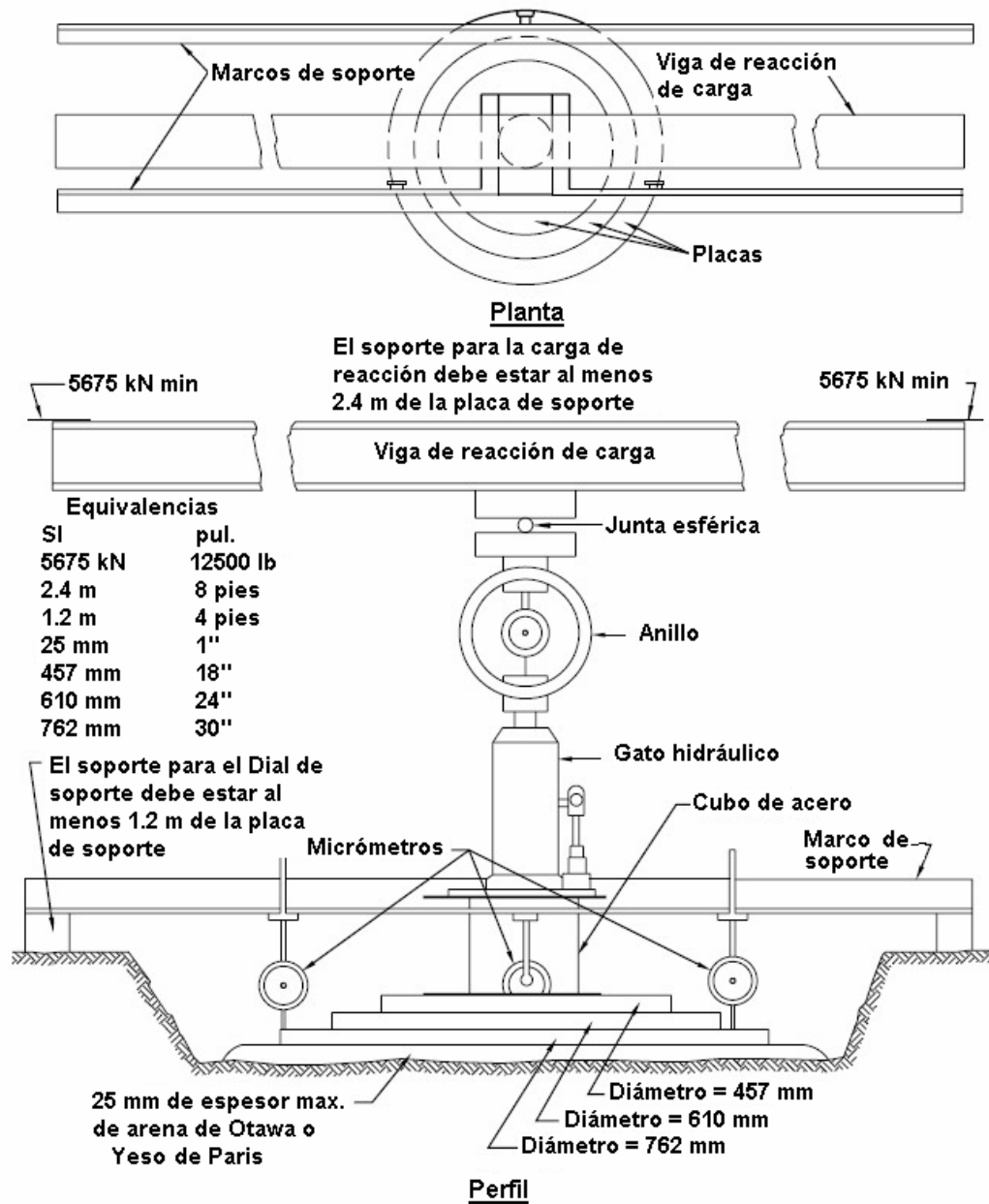
Ensayos con carga estática no repetida efectuados en el sitio son usados para evaluación y diseño de estructuras de pavimento. Los ensayos con carga estática no repetida efectuados en suelos, bases no cementadas y en materiales de sub-base, para determinar el modulo de reacción de la sub-rasante o una medida de la resistencia al corte de las capas del pavimento.

4.3.1 Equipo

Equipo para prueba de campo – El dispositivo requerido para el ensayo en el terreno se muestra parcialmente en la Figura 1 y consiste en lo siguiente:

Dispositivo de carga – Un camión o remolque o una combinación de ambos, un tracto-remolque, un marco anclado u otra estructura cargada con peso suficiente para proporcionar la reacción deseada sobre la superficie durante el ensayo. Los puntos de apoyo (ruedas en el caso de un camión o remolque) deberán estar al menos a 2.4 m (8 pies) de la circunferencia de la placa de apoyo de mayor diámetro que se está empleando. La carga muerta deberá ser al menos de 11350 kg (25000 lb).

Figura 11. Equipo para el ensayo de placa



Ensamblaje de gato hidráulico – Con un accesorio esférico de soporte, capaz de aplicar y soltar la carga en incrementos. El gato deberá tener suficiente capacidad para aplicar la máxima carga requerida, y deberá estar provisto de un manómetro perfectamente calibrado, o de un anillo de carga, que indique la magnitud de la carga aplicada.

Placa de soporte – Un conjunto de placas de apoyos circulares de acero de no menos de 25.4 mm (1") de espesor cada una, de tal forma que se puedan organizar en forma piramidal para garantizar rigidez, y que tengan diámetros de 152 a 762 mm (6" a 30"). Los diámetros de las placas adyacentes en la disposición piramidal no deberán diferir en más de 152 mm (6"). Se pueden emplear placas de aleación de aluminio No.24ST de 38 mm (1½") de espesor en lugar de placas de acero.

Se recomienda un mínimo de cuatro placas de tamaños diferentes para fines de diseño ó evaluación de pavimentos. Para propósitos de evaluación solamente, se debe emplear una sola placa garantizando que su área sea igual al área de contacto de la llanta correspondiendo a lo que se pueda considerar como la combinación más crítica de condiciones de carga por rueda y presión de contacto. Con el fin de proporcionar datos indicativos del índice de soporte (por ejemplo la determinación del índice de soporte relativo a través de un período de un año), se puede emplear solo una placa de cualquier tamaño escogido.

Diales indicadores (deformímetros) – Tres o más, graduados en unidades de 0.02 mm (0.001"), capaces de registrar una deflexión acumulada de al menos 25.4 mm (1") u otros dispositivos equivalentes para medir deformaciones.

Viga de deflexión – Sobre la cual se deberán montar los deformímetros. La viga puede ser un tubo negro estándar de 63.5 mm (2½") de diámetro o un ángulo de acero de 76 x 76 x 6 mm (3" x 3" x ¼"), o equivalente. Debe tener 5.5 m (18 pies) de largo y debe descansar sobre soportes localizados por lo menos a 2.4 m (8 pies) de la circunferencia de la placa de soporte o de la rueda o pata de apoyo más próxima. Todo el sistema para medir las deflexiones deberá estar adecuadamente protegido de rayos directos del sol, de la lluvia, etc.

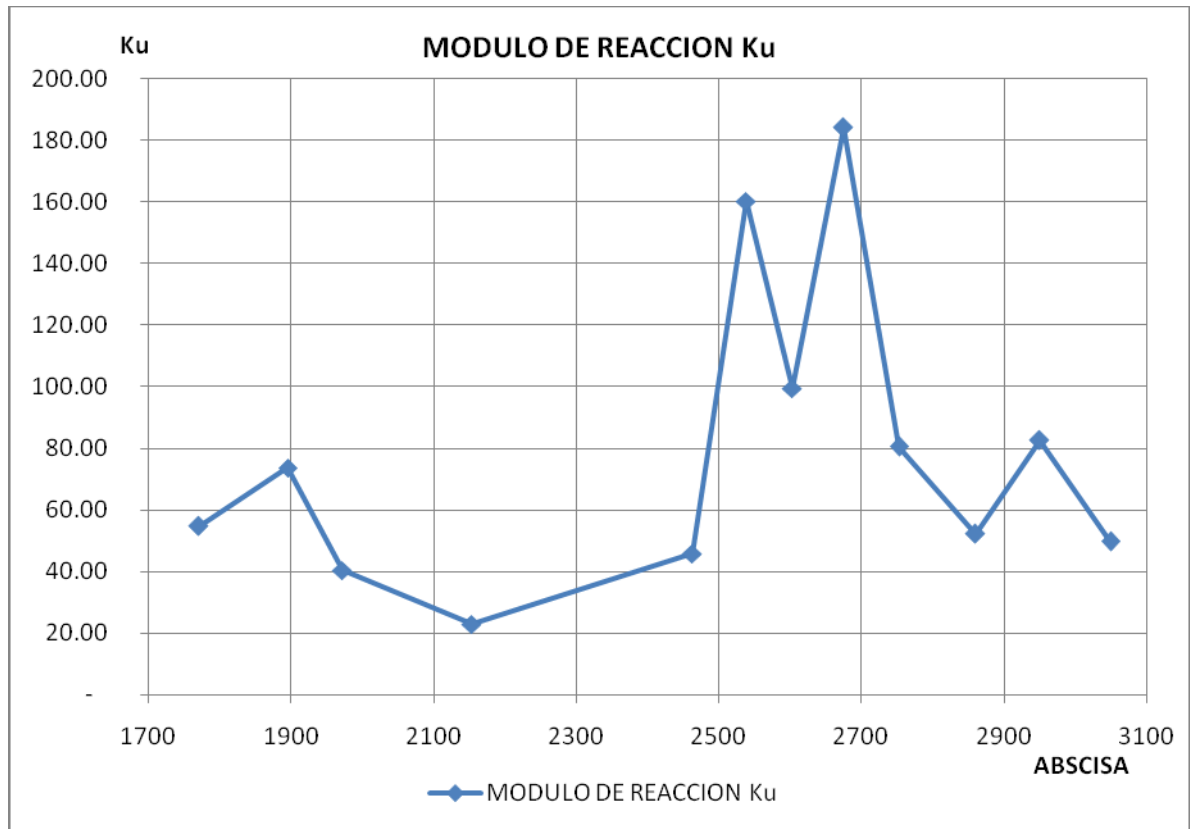
Herramientas varias – Incluyen un nivel de burbuja, para la preparación de la superficie que se va a ensayar y para la operación del equipo.

Equipos para prueba de consolidación – Equipo necesario para tallar una muestra inalterada de suelo dentro de un anillo de consolidación, consolidómetro, balanzas, horno, y herramientas varias para determinación del contenido de agua.

Tabla 6. Resultados ensayo de placa

No.	MODULO DE REACCION Ku			ABSCISAS
	Mpa/m	lb/pul ³	kg/cm ³	
158	54.73	198.70	5.50	1770
157	73.64	267.34	7.40	1895
1	40.30	146.30		1972
13	22.80	82.80		2153
152	45.70	166.00		2463
153	160.22	581.65	16.10	2538
154	99.52	361.27	10.00	2603
155	184.11	668.35	18.50	2675
151	80.61	292.63	8.10	2753
150	52.20	189.60		2860
5	82.60	300.00		2950
156	49.80	181.00		3050

Figura 12. Modulo de reacción de la subrasante



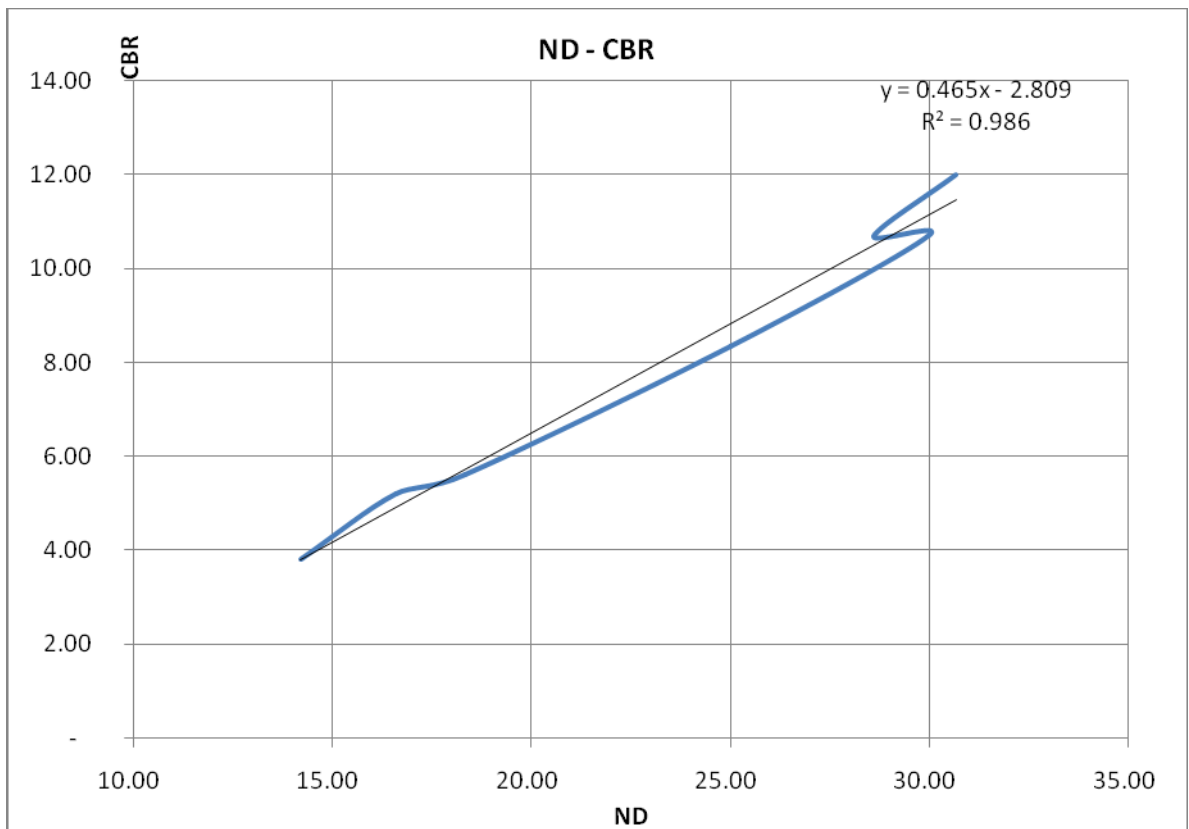
5. CORRELACIONES OBTENIDAS

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de PDC, CBR y Placa durante las etapas de diseño y ejecución del proyecto, se obtuvo las correlaciones presentes para la zona de influencia del proyecto.

5.1 ENTRE ENSAYOS DE PDC Y CBR

Se tomaron los resultados obtenidos en la etapa de diseño y construcción, los cuales presentaron resultados aproximados de acuerdo a las abscisas sobre las cuales se realizaron.

Figura 13. PDC Vs CBR



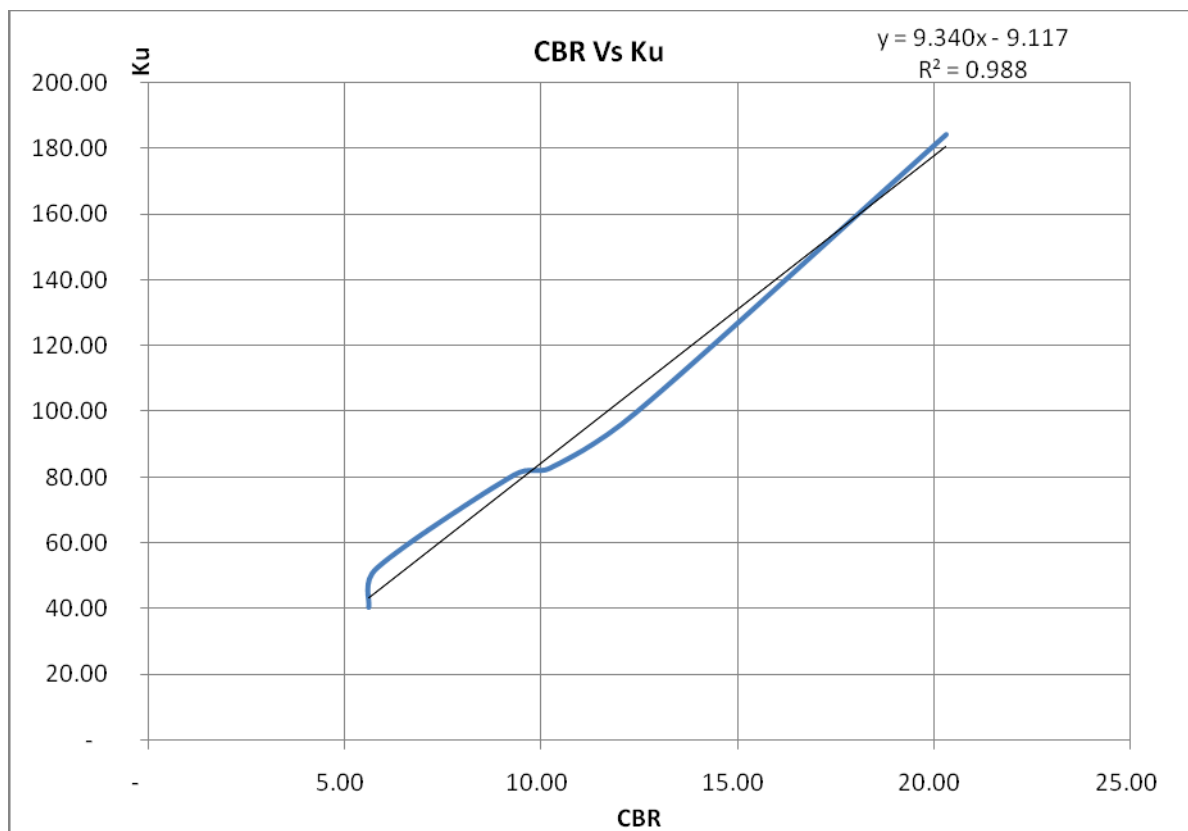
Para calcular el CBR a partir del índice PDC empleamos la siguiente ecuación:

$$\text{CBR} = 0.465 \text{ ND} - 2.809$$

5.2 ENTRE ENSAYOS DE CBR Y PLACA

Los ensayos de placa fueron realizados sobre las capas de subrasante y base estabilizada con cemento (capa apoyada sobre la subrasante) de 20 cm de espesor, pero para el fin de este proyecto, solo se tuvo en cuenta los resultados obtenidos sobre la subrasante.

Figura 14. CBR Vs Ensayo de Placa



Para obtener el módulo de reacción a partir del CBR inalterado utilizamos la siguiente ecuación:

$$K_u = 9.34 \text{ CBR} - 9.117$$

6. CONCLUSIONES

- Los valores obtenidos para el ensayo de CBR efectuados sobre la subrasante en la etapa de diseño, presentan resistencia de media a alta con valores que van desde 5.20% hasta 12%, lo cual ofrece una muy buena capa de apoyo a la estructura de pavimento.
- Los resultados obtenidos para el CBR durante la etapa de diseño, correlacionados con el PDC por las ecuaciones planteadas por el MOPT y el XIII Congreso de Ingeniería, presentan resultados más bajos, lo cual se vería reflejado en el sobrediseño de la estructura de pavimento, generando mayores costos para el proyecto.
- Debido a las variaciones obtenidas con las correlaciones planteadas para los diferentes ensayos que miden la capacidad de soporte de los suelos, es recomendable plantear las ecuaciones propias para cada zona, o realizar los ensayos directos, que frecuentemente resultan más engorrosos y costosos. No se deben correlacionar por medio de ecuaciones que pueden arrojar resultados que no exponen las condiciones reales sobre las cuales se apoyaran las estructuras.
- Las ecuaciones planteadas son para las condiciones y ensayos de la zona de influencia del proyecto, por lo que se debe verificar su aplicación y corrección, en caso de ser necesario, para su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos de Concreto. Londoño, Cipriano Alberto. 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Pavimentos de Concreto: Manual de Diseño. 1991.

XI CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO. Evaluación de la capacidad de soporte del terreno por medio de un equipo de penetración dinámica. TUPIA CORDOVA, Carlos y ALVA HURTADO, Jorge. Noviembre de 2001.

EL PENETROMETRO DINAMICO DE CONO COMO UNA ALTERNATIVA PARA DETERMINAR EL CBR DEL SUELO (PDC vs. CBR). MARTÍNEZ BECERRA, Nikolai Espartaco. ARISTA SEVERINO, Melissa Evelyn. ANGLAS SCHMIDT, Jessica.